

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Spalovací zařízení pro termickou likvidaci nízko a středně aktivních
radioodpadů

Combustion Equipment for Thermal Incineration of Low and Medium
Radioactive Waste

Student:

Bc. Tomáš Michna

Vedoucí diplomové práce:

prof. Ing. Pavel Kolát, DrSc.

Ostrava 2016

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra energetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Michna**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení
Téma: **Spalovací zařízení pro termickou likvidaci nízko a středně aktivních radioodpadů**
Combustion Equipment for Thermal Incineration of Low and Medium Radioactive Waste
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Proveďte návrh spalovacího zařízení pro termickou likvidaci nízko a středně-aktivních pevných a kapalných RAO. Navržená technologie musí splňovat podmínky požadované českými zákony č. 354/2002 Sb. a dalšími, i podmínky evropského předpisu č. 2000/76/EC. Technologie bude mít poloautomatické dávkování odpadu do spalovací komory, mechanické roštování, rošt s žáruvzdornými roštnicemi a poloautomatické vysypávání popela do vysokotlakého lisovacího zařízení. Proveďte základní tepelné a aerodynamické výpočty. Navrhněte geometrii spalovací a dohořivací komory a zvolte vhodný typ výměníku spaliny - vzduch. Navrhněte ideově technologii čištění spalin. Spalovací zařízení zařazené do technologické linky musí zpracovat min. 100 tun pevného odpadu ročně s výhřevností 18 MJ/kg a relativní vlhkostí 30 %.

Seznam doporučené odborné literatury:

Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.
Vyhláška SÚJB č. 307/2002 Sb., ve znění pozdějších předpisů.
Podmínky přijatelnosti k ukládání RAO do úložiště Bratrství.
Management of NORM Residues, IAEA-TECDOC 1712, IAEA, Vídeň 2013.
Sborníky z konferencí Naturally occurring radioactive materials (NORM IV-VI), IAEA, Vídeň.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 31.10.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016


prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.
vedoucí katedry

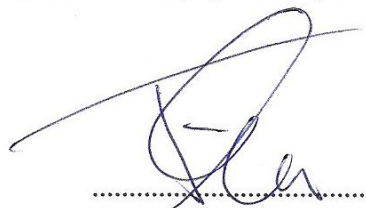



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16. 05. 2016

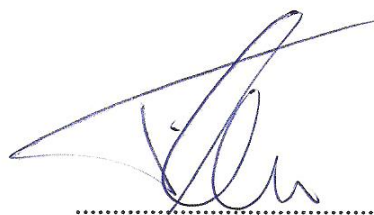
A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized 'T' and 'M' followed by a cursive 'na'. The signature is written over a horizontal dotted line.

Tomáš Michna

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- было́ сже́днано, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- было́ сже́днано, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 16. 05. 2016



Tomáš Michna

Jméno a příjmení autora práce: Tomáš Michna

Adresa trvalého pobytu autora práce: Služovice 82, 747 35 Služovice

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Michna, T.: Spalovací zařízení pro termickou likvidaci nízko a středně aktivních radioodpadů. (Vedoucí DP: Kolát, P.), VŠB-TU Ostrava, fakulta strojní, katedra energetiky 361, 2016.

Diplomová práce se zabývá spalovacím zařízením na redukci a likvidaci radioaktivního odpadu. Cílem práce je návrh geometrie spalování a výpočet termické likvidace odpadu. Teoretická část zahrnuje varianty návrhu spaloven radioaktivního odpadu s ohledem i na čištění spalin. Grafická část diplomové práce obsahuje výkresy výměníku a vyzdívky spalovacího zařízení. Výsledkem diplomové práce je návrh spalovny radioaktivních odpadu s výkonem 45 kg/h, vhodně dimenzovaná dohořivací komora pro dokonalé spálení tuhých zbytků, návrh výměníku a čištění spalin.

ANNOTATION OF THE THESIS

Michna, T.: Combustion Equipment for Thermal Incineration of Low and Medium Radioactive Waste. (head: Kolát, P.), VŠB-TU Ostrava, faculty of Mechanical Engineering, department of Energetic 361, 2016.

The thesis deals with a combustion device for reduction and disposal of radioactive waste. Goal of this work is to design and calculate the geometry of the combustion thermal waste disposal. The theoretical part involves design options radioactive waste incinerators and with respect to flue gas cleaning . Graphic part of the thesis contains drawings of the exchanger and the lining of the furnace. The result of this thesis is the design of radioactive waste incineration plant with an output of 45kg/h, appropriately dimensioned combustion chamber for complete combustion of solid residues , designing the heat and flue gas cleaning.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů

1.	Úvod	1
2.	Podmínky pro spalování a rozdělení RAO	3
2.1.	Pevné odpady	3
2.2.	Kapalné odpady	3
2.3.	Plynné odpady	3
2.4.	Rozdělení odpadů dle kategorií	4
3.	Druhy záření	5
4.	Třídění a likvidace RAO	6
4.1.	Úprava	6
5.	Termická likvidace RAO	7
5.1.	Odpady pro spalování	7
5.2.	Nežádoucí odpady pro spalování:	8
5.3.	Faktory důležité pro spalování:	8
5.4.	Požadavky pro spalování RAO	8
5.5.	Radiologické standardy pro provoz spalovny	9
6.	Čištění spalin	10
6.1.	Suché procesy	10
6.2.	Polosuché procesy	11
6.3.	Mokré procesy	11
6.4.	Filtrační metody	12
7.	Spalování ve spalovně RAO	14
7.1.	Spalování RAO	14
7.2.	Úprava odpadu před a po spalování	15
7.3.	Dávkování do spalovací komory	16

7.4.	Proces spalování	17
7.5.	Odvod popela	18
7.6.	Podtlak ve spalovacím systému.....	18
7.7.	Čištění spalin	18
8.	Lisování RAO.....	21
9.	Návrh spalování.....	22
9.1.	Výhřevnost RAO	22
9.2.	Spalovací a dohořivací komora	24
9.3.	Návrh velikosti dohořivací komory.....	26
9.4.	Vyzdívka	26
10.	Výměník – Návrh	27
10.1.	Parametry výměníku.....	27
10.2.	Ztráty spaliny.....	37
10.3.	Ztráty vzduch.....	40
11.	ZÁVĚR.....	41
	Seznam použité literatury	42
	Seznam tabulek, obrázků a grafů.....	43
	Seznam příloh.....	44

Seznam použitých značek a symbolů

RAO	radioaktivní odpad	
JE	jaderná elektrárna	
Q	tepelný výkon	[kW]
Q_c	celková výhřevnost odpadu	[MJ/kg]
P_p	celkový tepelný příkon z odpadu	[MW]
P_r	Prandtlovo číslo	[1]
I	první tah	[1]
II	druhý tah	[1]
III	třetí tah	[1]
IV	čtvrtý tah	[1]
m_o	výkon spalovny množství paliva	[kg/s]
$Nu_{sp,1}$	Nusseltovo kritérium na vstupu spalin do trubek	[1]
$Nu_{sp,2}$	Nusseltovo kritérium na výstupu spalin z trubek	[1]
$Nu_{vz,1}$	Nusseltovo kritérium na vstupu vzduchu do výměníku	[1]
$Nu_{vz,2}$	Nusseltovo kritérium na výstupu vzduchu z výměníku	[1]
$Re_{sp,1}$	Reynoldsovo číslo na vstupu spalin do trubek	[1]
$Re_{sp,2}$	Reynoldsovo číslo na výstupu spalin z trubek	[1]
$Re_{vz,1}$	Reynoldsovo číslo na vstupu vzduchu do výměníku	[1]
$Re_{vz,2}$	Reynoldsovo číslo na výstupu spalin z výměníku	[1]
S	plocha	[m ²]
S_k	rozteč trubek v řadě	[m]
S_p	rozteč řad	[m]
V_{DK}	objem dohořívací komory	[m ³]
V_{H_2O}	objem/množství vody ve spalinách	[m ³ _N /kg]
V_{sp1}	skutečné množství spalin vstup do výměníku	[m ³ _N /s]
V_{sp2}	množství spalin v dohořívací komoře	[m ³ _N /s]
V_{sp2}	skutečné množství spalin výstup z výměníku	[m ³ _N /s]
$V^s_{sp,t}$	teoretické suché množství spalin	[m ³ _N /kg]
$V^s_{vz,t}$	teoretické suché množství spalovacího vzduchu	[m ³ _N /kg]
$V^s_{vz,t,pl}$	teoretické suché množství spalovacího vzduchu pro plyn	[m ³ _N / m ³ _N]
$V^v_{sp,obj}$	objemový tok vlhkých spalin	[m ³ _N / s]
$V^v_{spobj,c}$	objemový tok vlhkých spalin celkový	[m ³ _N / s]
$V^v_{spobj,pl}$	objemový tok vlhkých spalin plyn	[m ³ _N / s]
$V^v_{sp,s}$	skutečné množství vlhkých spalin	[m ³ _N / kg]
$V^v_{sp,s,pl}$	skutečné množství vlhkých spalin plyn	[m ³ _N / m ³ _N]

$V_{sp,t}^{\nu}$	teoretické množství vlhkých spalin	$[m^3_N/ kg]$
$V_{vz,t}^{\nu}$	teoretické množství vlhkého spalovacího vzduchu	$[m^3_N/ kg]$
$V_{vz,c,o}$	množství vzduchu celkového odpad	$[m^3_N/ s]$
$V_{vz,n}$	množství vzduchu výměník	$[m^3_N/ s]$
$V_{vz,sm}$	množství vzduchu směšovač	$[m^3_N/ s]$
V_{vzI}	množství vzduchu spalovací komora	$[m^3_N/ s]$
V_{vz1}	množství vzduchu vstup do výměníku	$[m^3_N/ s]$
V_{vz2}	množství vzduchu dohořivací komora	$[m^3_N/ s]$
V_{vz2}	množství vzduchu výstup z výměníku	$[m^3_N/ s]$
V_{vzI+II}	množství vzduchu I.+II. komora	$[m^3_N/ s]$
W_{vz1}	rychlost vzduchu na vstupu do výměníku	$[m/s]$
W_{vz2}	rychlost vzduchu na výstupu z výměníku	$[m/s]$
a	rozměr dohořivací komory	$[m]$
a_c	rozměr dohořivací komory	$[m]$
b	rozměr dohořivací komory	$[m]$
c	rozměr dohořivací komory	$[m]$
c_{sp}	měrná tepelná kapacita spalin	$[kJ*kg^{-1}*^{\circ}C^{-1}]$
c_{vz}	měrná tepelná kapacita vzduchu	$[J*kg^{-1}*K^{-1}]$
d_1	vnitřní průměr trubky	$[mm]$
d_2	vnější průměr trubky	$[mm]$
d_{ekv}	ekvivalentní průměr trubky	$[m]$
i	teplo sdílené ve výměníku	$[kJ/kg]$
I	střední délka paprsku	$[m]$
k	střední hodnota součinitele prostupu tepla	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
k_1	součinitele prostupu tepla pro výměník vstup	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
k_2	součinitele prostupu tepla pro výměník výstup	$[W*m^{-1}*K^{-1}]$
l	délka trubky výměníku	$[m]$
n_1	přebytek vzduchu ve spalovací komoře	$[1]$
n_2	přebytek vzduchu v dohořivací komoře	$[1]$
n_c	přebytek vzduchu celkový	$[1]$
n_p	přebytek vzduchu pro plyn	$[1]$
n_{tr}	počet trubek	$[ks]$
p	tlak	$[Pa]$
p_{pod}	podtlak spalovací komora	$[Pa]$
$p_{tř}$	tlaková ztráta třením	$[Pa]$
p_{ztr}	celková tlaková třením	$[Pa]$
p_{zmi}	ztráta místní	$[Pa]$
p_{zmi}	celková ztráta místní	$[Pa]$
p_z	celková tlaková ztráta na straně spalin	$[Pa]$

t_c	rozměr dohořivací komory	[m]
t_m	teplota media	[°C]
t_{sp}	teplota spalin	[°C]
t_{sp1}	teplota spalin ve spalovací komoře	[°C]
t_{sp2}	teplota spalin v dohořivací komoře	[°C]
t_{st}	teplota stěny	[°C]
t_{vz}	teplota vzduchu	[°C]
$t_{vz,2}$	teplota vzduchu na výstupu s výměníku	[°C]
v_c	rozměr dohořivací komory	[m]
w_{sp1}	rychlost spalin na vstupu do trubek	[m/s]
w_{sp2}	rychlost spalin na výstupu z trubek	[m/s]
w_{sp1}	rychlost spalin na vstupu do trubek	[m/s]
z_1	tepelná ztráta popel	[%]
α	součinitel přestupu tepla	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
α_1	součinitel přestupu tepla na vstupu spalin	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
α_2	součinitel přestupu tepla na výstupu spalin	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
α_{sp}	součinitel přestupu tepla na horké straně	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
$\alpha_{vz,1}$	součinitel přestupu tepla na vstupu vzduchu výměník	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
$\alpha_{vz,2}$	součinitel přestupu tepla na výstupu vzduchu výměník	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
β	součinitel přestupu tepla sáláním	[W*m ⁻² *K ⁻¹]
Δt_s	střední logaritmický spád	[°C]
ε_{CO_2}	poměrná pohltivost CO ₂	[1]
ε_{H_2O}	poměrná pohltivost H ₂ O	[1]
ε_{sp}	poměrná pohltivost spaliny	[1]
λ	tepelná vodivost	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
λ_m	tepelná vodivost media	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
λ_o	tepelná vodivost oceli	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
λ_{ST}	tepelná vodivost stěny	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
λ_{vz}	tepelná vodivost vzduchu	[W*m ⁻¹ *K ⁻¹]
μ	dynamická viskozita	[Pa*s]
μ_m	dynamická viskozita media	[Pa*s]
μ_{st}	dynamická viskozita stěny	[Pa*s]
v_{sp}	kinetická viskozita spalin	[m ² /s]
ξ	součinitel místní ztráty	[1]
ρ_{sp}	hustota spalin	[kg/m ³]
ρ_{vz}	hustota vzduchu	[kg/m ³]
$\tau_{sp,kds}$	doba setrvání spalin v dohořivací komoře	[s]
v	součinitel množství páry ve vzduchu	[1]

1. Úvod

V dnešní rychle se rozvíjející době, kdy se celá společnost snaží snižovat dopady na životní prostředí, myslíme i na radioaktivní odpady. Radioaktivní odpady vznikají, jak při výrobě elektrické energie v jaderných elektrárnách, tak při využívání radionuklidů a ionizujících záření v nukleární medicíně. Tyto odpady však nevznikají jen ve zmiňovaných odvětvích, ale i v průmyslu, zemědělství a dalších oblastech.

Ve srovnání s ostatními odpady, můžeme konstatovat, že jejich množství je zanedbatelné. Z hlediska bezpečnosti jsou však právě jedněmi z nejnebezpečnějších. Likvidace je však náročná a legislativně ošetřená. Z hlediska životního prostředí, zejména ochrany lidí, s těmito odpady musíme nakládat obezřetně. Čím více se nám podaří snížit množství vzniklého odpadu, tím méně budeme muset stavět další úložiště.

V České republice tento druh odpadu podléhá zákonu 18/1997 Sb., ve kterém jsou ustanoveny podmínky pro mírové využívání jaderné energie a ionizujících záření. Zákon ustanovuje způsob využívání, systém ochrany osob, povinnost zásahů ke snížení ozáření při radiačních nehodách, požadavky pro zajištění odpovědnosti za škody, zajištění bezpečného nakládání, dozor a kontroly státní správy.

Při spalování radioaktivních odpadů dochází k minimalizaci množství a vznikne nepatrné množství radioaktivního popelu oproti celku, který jsme spalovali. Vzniklá popelovina se dále třídí do 5 kategorií (I.-V.), a to dle poločasu rozpadu a intenzity radioaktivity.

Po úpravě se tyto odpady ukládají do hlubinných úložišť ve speciálních kontejnerech. Před uložením se provádí úpravy odpadu. Pevné zbytky se lisují a kapalně zahušťují.

Spalovny RAO napomáhají ke snížení množství radioaktivního odpadu, ale v očích veřejnosti vzbuzují zneklidnění. Dnešní tzv. ekologičtí aktivisté nevěří těmto zařízením a stáhnou většinu neodborné veřejnosti na svou stranu.

V této práci se zabývám spalováním RAO, které vede ke snížení objemového množství a likvidaci odpadu různého stavu.

2. Podmínky pro spalování a rozdělení RAO

V zařízení pro spalování RAO, se silo tuhého odpadu konstruuje tak, aby v něm byl po celou dobu spalovacího procesu podtlak. Odebraný odpadní vzduch se nasává zpět do ohniště. Pokud je však spalovna mimo provoz musí se tento vzduch vypouštět do ovzduší ve výšce, která je udána předpisem státní zprávy.

Spalovny podléhají přísným emisním normám. Např.: hmotnostní koncentrace tuhých zbytků nesmí překročit hranici 30mg/m^3 a hmotnostní koncentrace oxidu uhelnatého maximálně 100mg/m^3 . Z toho vyplývá, že spalovny RAO splňují mnohdy přísnější emisní normy oproti spalovnám jiných typů. Vše podléhá zákonu o ovzduší 309/1991 Sb.. [1]

2.1. Pevné odpady

Vznikají především v jaderných elektrárnách. Do kategorie takových odpadů se řadí vyhořelé jaderné palivo, ale i věci které mohou být ozářeny: textil, papír, sklo, části zařízení ad. Jsou to převážně materiály, které se využívají v JE a dalších odvětvích, kde se pracuje se škodlivým radioaktivním zářením.

2.2. Kapalné odpady

Zastupují největší objemovou část RAO. Řadíme do nich primární chladiwa v JE, ale i vodu v bazénech pro vyhořelé palivo. Jsou klasifikovány dvojím způsobem možnosti zpracování (likvidace). Odpadní voda se po snížení kontaminace a po přečištění vrátí zpět do systému JE nebo je možné ji při minimalizaci na přístupnou úroveň vypustit do vodního toku. V odpadní vodě vznikají nánosy, které nejsou dále použitelné a nesmí být vypouštěny pryč z JE.

2.3. Plynné odpady

Jejich vznik je zaviněn únikem výparů z paliva v reaktorové místnosti, při práci s vyhořelým palivem a ventilačním systémem. Plynné části jsou

vypouštěny ventilačním komínem. Jejich množství je sice velké, ale jsou nejméně škodlivé. Plynné části mají malý poločas rozpadu.

2.4. Rozdělení odpadů dle kategorií

Plynné, kapalné a pevné odpady můžeme dále dělit do 5 kategorií:

Kategorie I – nejvíce RAO, poločas rozpadu trvá až miliony let. Produkují velkou tepelnou energii.

Kategorie II – střední RAO, poločas rozpadu v řádu statisíce let. Produkují méně tepelné energie než kategorie I.

Kategorie III – nízké RAO, poločas rozpadu v desítkách tisíc let. Produkce tepelné energie je zanedbatelná.

Kategorie IV – RAO s krátkodobým škodlivým zářením, poločas rozpadu okolo tisíc let. Tepelná energie nepatrně vyšší než kategorie III.

Kategorie V – nejmenší radioaktivní záření, poločas rozpadu stovky let. Tepelná energie nulová.

3. Druhy záření

Alfa záření

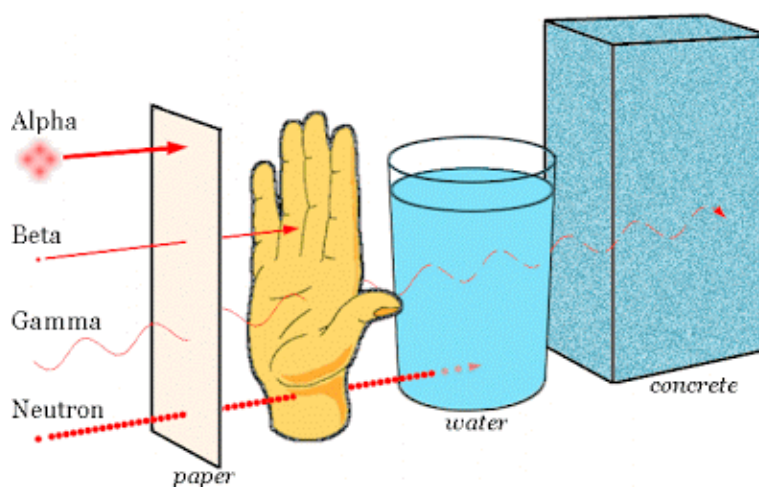
Jde o složení dvou protonů a dvou neutronů. Jedná se vlastně o jádro helia. Alfa záření je poměrně slabé radioaktivní záření, jsme schopni jej zastavit přes obyčejný papír. Má malou pronikavost a jeho rychlost je pomalá. Při vdechnutí, či požití ozářeného jídla může dojít k poškození vnitřní tkáně a způsobení biologických změn.

Beta záření

Pohybuje se velice rychle. Je tvořeno elektrony či pozitrony (elektrony s kladným nábojem). Je pronikavější než alfa záření, ale lze jej pohltit hliníkovým plechem o tloušťce pár milimetrů.

Gama záření

Má největší pronikavost a rychlostí se blíží rychlosti světla. Vlnová délka je podobná jako u rentgenového záření. Jsme jej schopni zastavit přes vrstvu olova nebo stěnu betonu. Je schopno proniknout lidským tělem. Gama záření je tvořeno radionuklidy z atomových jader spolu s beta zářením.



Obr.1. Prostupnost záření

(<http://www.allcinnarevenant.blogspot.cz/2008/10/3-radioaktivita.html>)

4. Třídění a likvidace RAO

Se stále větším využíváním radionuklidů nejen v JE, ale i v dalších odvětvích lidského snažení se zvětšuje množství vzniklého RAO. Vzniká otázka: Co dále s tímto odpadem? I přes negativní názory neodborné veřejnosti a samozvaných ochránců přírody a životního prostředí, kteří v mnoha případech neuznávají nic pokrokového, je spalování jedním z hlavních způsobů snížení objemu RAO.

4.1. Úprava

RAO rozdělujeme podle kategorií a skupenství. Je vhodné dělit odpady hned od prvopočátku jejich vzniku. Nedochází tak ke kontaminaci mezi sebou. Odpady třídíme ručně, nebo za použití strojů, které jsou uzpůsobeny k tomu, aby rozdělily odpad podle konkrétního druhu záření.

Hlavní části úpravy: redukce objemu, dočasné uložení, třídění, úřední náležitosti atd.

U pevného odpadu se používá v největší míře pro jeho objemovou redukci lisování. Nejvíce pak pro nespalitelný středně a nízko aktivní RAO. Lisování dělíme dále na vysokotlaké a nízkotlaké. Z názvů jednotlivých způsobů lisování vyplývá, že nízkotlaké je určeno pro úpravu odpadu, pro balení nebo pro dočasné uložení a vysokotlaké pro trvalou redukci odpadu k jeho uložení. Slisovaný odpad se dále může ukládat do sudů, které mají jako svůj obal další sud a mezera mezi sudy je zalita cementovo-betonovou směsí pro snížení škodlivého záření.

5. Termická likvidace RAO

Jak jsem již předznamenal několikrát výše, spalování je jednou z hlavních metod, která se využívá ke snížení objemu a hmotnosti RAO (použití hlavně pro kapalné a pevné odpady). Spalování je vhodnou metodou energetického využití odpadu. Redukcí odpadů se snižují další náklady, které je potřeba vynaložit na skladování a trvalé uložení odpadu. Největší skupinou spalovaného odpadu jsou nízkoaktivní odpady. Mezi ně řadíme například papír, dřevo, plasty, ale také pláště a oblečení (textil).

5.1. Odpady pro spalování

Většina pevných odpadů až 70 % jsou spalitelné. Kapalné odpady také spalujeme, ale záleží na jejich výhřevnosti. Kapalné a pevné odpady spalujeme společně. Provoz spalovacího zařízení se reguluje podle kvality dodávaného odpadu na rošt spalovací pece. Kapalné odpady se do spalovacího prostoru dodávají přes dýzu. Upravujeme jejich viskozitu přehříváním nebo za pomoci naředění rozpouštědlem.



Obr.2. Spalitelnost odpadů

(http://www.kdejinde.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/03/institut_3.html)

5.2. Nežádoucí odpady pro spalování:

- sklo, kov,
- malý obsah hořlavé složky,
- s velkou radioaktivitou,
- s velkým obsahem PVC, gumy pro jejich velký obsah kyselých složek při spalování,
- rozměrově nevyhovující,
- těkavé látky,
- odpady s nízkou produkcí tepla.

5.3. Faktory důležité pro spalování:

- výhřevnost – proměnlivá pro každý druh odpadu,
- fyzikální stav – ovlivňuje výkon spalování,
- chemický stav – možná tvorba nánosů a koroze na zařízení.

5.4. Požadavky pro spalování RAO

Některé odpady obsahují vodu a jiné nespalitelné části, které negativně ovlivňují proces hoření. Musíme zajistit určité procento hořlaviny v odpadech pro kvalitní hoření a vznik co nejmenšího množství popela, který je výsledným produktem spalování a pohybuje se okolo 90–98 %, zbytek z RAO je zachycen pomocí filtru pro čištění spalin.

Spalování RAO musí probíhat za daných předpisů v souladu s bezpečnostními předpisy. Musíme počítat s různými druhy RAO vůči kvalitě, vlastnostem, rozměrům a proměnlivé výhřevnosti. Je potřeba vybrat nejvhodnější způsob pro čištění, aby byl eliminován únik radioaktivních spalin do ovzduší. Z toho důvodu používáme spalovací zařízení, která pracují s podtlakem, a tím minimalizují únik do okolního prostředí.

Tabulka 1. *Výhřevnost odpadu*

Druh odpadu	Výhřevnost (MJ/kg)
Čerstvé zeleninové odpady (65 % vody)	3,35
Dřevěný odpad	14,6 až 16,3
Papírový odpad	14,6
PVC odpad	18,8
Staré pneumatiky	36,2
Polyetylénové odpady	41,8

(http://www.ecmost.cz/clanky.php?page=energie_skladky)

5.5. Radiologické standardy pro provoz spalovny

Cílem těchto požadavků je v co nejmenší míře udržet radiační šíření, jak v provozu zařízení, tak při havarijních stavech. Pro dodržení bezpečnostních předpisů se používají i speciální vzduchotěsné kontejnery pro transport odpadu.

Odpady dle aktivity dělíme:

- směs odpadů (toxické a radioaktivní),
- odpady beta a gama (s malým podílem úrovně aktivity alfa),
- odpady alfa.

Z hlediska ochrany obyvatel, ochrany životního prostředí a zaměstnanců při možných havarijních stavech se musíme postarat o bezpečnost v následujících oblastech:

- výběr vhodné lokality pro výstavbu,
- údržba a provoz,
- havarijní připravenost a plány pro evakuaci.

Výstavba těchto zařízení probíhá za přísných bezpečnostních norem a pod dohledem státního dozoru.

6. Čištění spalin

Důležitou částí spalovacího procesu je čištění spalin. Je hlavním faktorem ovlivňujícím výstupní spaliny. Spaliny se skládají z prachových částic a obsahují CO, NO_x, SO₂, ale mohou obsahovat i rtuť, olovo, měď, nikl apod. Proto je potřeba volit vhodné metody čištění spalin. Spaliny odcházejí ze spalovací komory s teplotou okolo 1000 °C. Abychom mohli spaliny čistit, musíme je nejprve ochladit v trubkových výměnících na teplotu, za které jsme schopni dosáhnout cyklu čištění spalin. Přitom dbáme na ochranu pracovníků, životního prostředí a ochranu celého zařízení.

Vzhledem ke snížení teploty pro čištění vzniká problém s možným vznikem koroze. Tím se navyšují náklady na pořízení zařízení.

Metody čištění:

- suchá metoda,
- polosuchá metoda,
- mokrá metoda,
- filtrační metody (elektroodlučovače, filtry).

6.1. Suché procesy

Suché procesy fungují na principu dávkování sorbentů v práškovém stavu. Při použití tohoto systému předpokládáme, že zařízení produkuje velké emise. Metodu můžeme použít dvěma způsoby, buď nástřikem vápenného hydrátu přímo do proudu spalin, nebo dávkováním aditiva do odpadu.

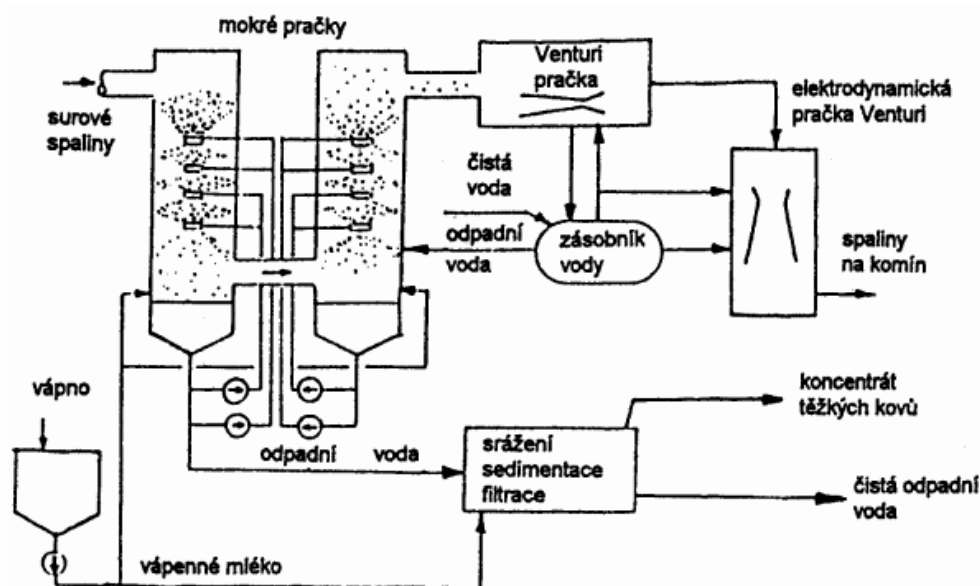
Výhodou suchých procesů je, že při nich nedochází ke vzniku odpadních vod. Nevýhodou je však vznik směsi prachu s obsahem kyselých složek v něm zachycených a PCDD, PCDF (dioxiny, polychlorované dibenzofurany). [2]

6.2. Polosuché procesy

V tomto procesu je sorpční činidlo v kapalně formě, suspenze či roztok. Ve většině případů je sorbentem vápno. Suspenze nebo roztok je vstřikován do spalín za spalovací komorou a spaliny vlastním teplem odpařují vodu ze směsi. Suchý prach unášený dál spalovacím zařízením jde na odloučení přes filtry, většinou tkaninové. Prach, který se zachytí na filtrech je tvořen reakčními produkty a popílkem. Polosuché procesy dosahují účinnosti okolo 70–90 %. Při vstřiku sorbentu se snižuje teplota spalín. V takovém případě musíme dávat pozor na to, aby nedošlo k dosažení rosného bodu. Docházelo by pak ke kondenzaci spalín, tím by se mohla vytvořit koroze a usazeniny, které by nevyhnutelně poškodily správnou funkčnost zařízení.

6.3. Mokrý procesy

Nejčastěji používaná metoda čištění spalín, ale pro spalovny RAO se používá velmi málo, protože hrozí únik radioaktivních látek do vody. Zjednodušeně se dá říci, že čištění probíhá jako sprcha pomocí „vypírání“ spalín. Tato metoda je vhodná pro absorbování kyselých plynů a prachových částí. Oproti polosuché metodě, jsme schopni dosahovat větší účinnosti. [2]



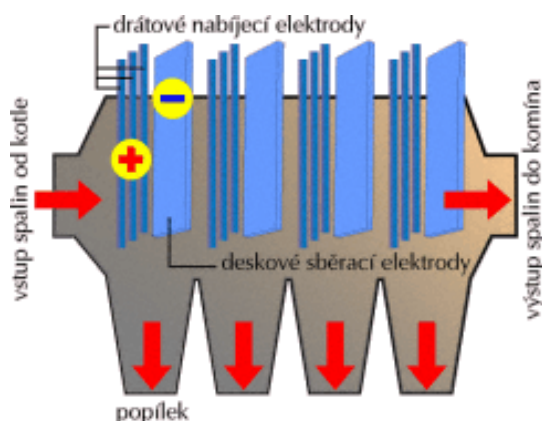
Obr.3. Schéma mokrého čištění spalín [2]

6.4. Filtrační metody

Jedná se o formu odloučení prachových částic, jejich obsah je závislý na několika faktorech: množství spalovacího vzduchu, obsahu popela v odpadu, rychlosti proudění, výšce lože odpadu.

Elektroodlučovač

Elektrické odlučovače, nebo jinak řečeno elektrofiltry, jsou zařízeními budoucnosti. Při zachycení popílku na filtru získá elektrickým polem elektrický náboj, a poté se elektrostatickou silou usazuje na usazovací elektrodě. Pro odstranění nánosů z usazovací elektrody se používá oklepávání, načež nánosy padají dolů do výsypky. Elektroodlučovače mají vysokou účinnost pohybující se až okolo 99 %, ale jsou nákladné a rozměrově náročné. Často se používají jako předstupeň pro mokré metody čištění spalin.



Obr.4. Elektroodlučovač

(http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=1&ee_chapter=2.3.4)

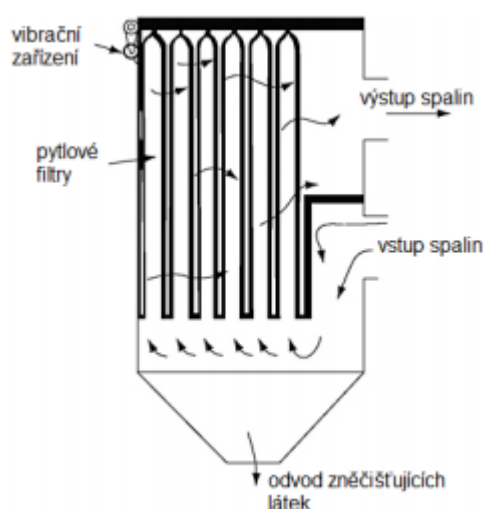
Mechanické odlučovače

Jsou založeny na principu gravitace, nebo setrvačné síly poletujících tuhých částí ve spalinách. Jedním z prvních mechanických odlučovačů byla tzv. usazovací komora. Funkce těchto odlučovačů spočívá ve snížení rychlosti spalin za pomoci působení gravitace k pádu tuhých částí. V dnešní době se již nevyužívají a nahradily je mokré metody čištění spalin.

Filtry

Pracují na základě vhodně volené filtrační tkaniny, přes ventilátory je nasáván znečištěný vzduch. Prach obsažený ve vzduchu je zachycen na tkanině, a poté po zanesení tkaniny je pomocí tlakového vzduchu regenerována. Rozhodující je vhodně zvolené umístění filtru pro jeho zajištění dobré funkce a také nepřesahující teploty, na které je filtr navrhován, aby nedošlo k jeho vznícení.

Tkaninové filtry nemůžeme použít na lepidlo a vlhké spaliny. Jejich výhodou jsou však nízké pořizovací náklady, spolehlivost a velká účinnost.



Obr.5. Tkaninový filtr

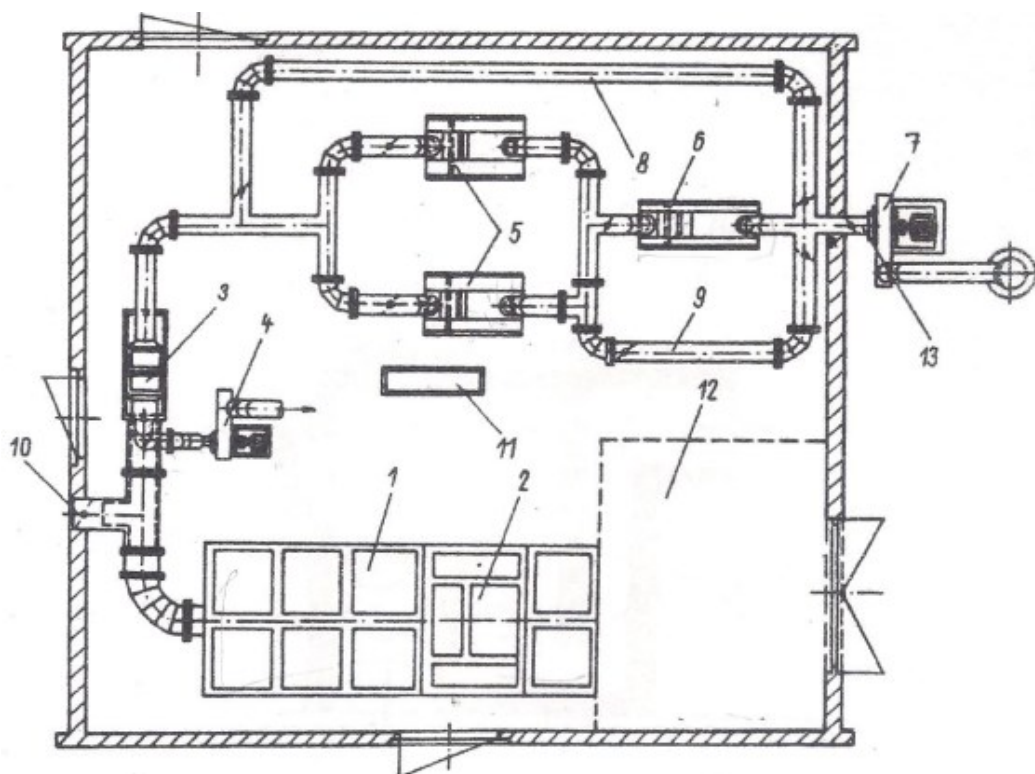
(<http://www.globalspec.com/reference/23701/203279/F-Fabric-Filter-Bag-fFWS-Constructed-wetland>)

Vysokoteplotní filtry

jsou filtry tkaninové nebo kovové, které se používají hned na výstupu ze spalovací komory. Nespálené zbytky se zachytí na filtr, kde se spálí na popel. Jeden z filtrů je keramický svíčkový. Při vysokých teplotách bohužel dochází k jeho popraskání, a tím k poškození. Pro jeho ochranu jej před použitím natřeme inertním nátěrem, tím se zvýší i účinnost, protože není možné zanesené póry čistit profukem.

7. Spalování ve spalovně RAO

Nejznámější výrobce spaloven RAO odpadu v Evropě je firma NUKEM, která patří do skupiny TESSAG a spadá pod konsorcium RWE Solutions. Poskytuje kompletní řešení výstavby a správy spaloven a věnuje se vývoji nových možností a zlepšování spalování RAO.



Obr.6. Schéma spalovny hlavní části [3]

1. Spalovací komora, 2. Dávkovací zařízení, 3. Chladič spalin, 4. Vzduchový ventilátor, 5. Tkaninové filtry, 6. Absolutní filtry, 7. Spalinový ventilátor, 8. Obtok spalin I, 9. Obtok spalin II, 10. Směšovací klapka, 11. Ovládací zařízení, 12. Uložení RAO, 13. Kontrola měření radiace

7.1. Spalování RAO

Jak jsem již výše uvedl, spalování se největší mírou podílí na objemové a hmotnostní redukci RAO. Spalujeme, jak odpad JE, tak i výzkumných, lékařských center i průmyslových odvětví, kde jsou nukleární látky používány.

Firma NUKEM vyvinula systém spalovny se specifickými požadavky:

- žádná tvorba strusky,
- stavebnicový systém výstavby – flexibilní,
- nepotřebná předběžná úprava odpadu,
- trvalý provoz,
- vysoce účinný systém čištění spalín,
- spalování kapalného odpadu s pevným odpadem.

Stavebnicový systém společnosti NUKEM, zabezpečuje určitou flexibilitu navrhnutí spalovacího zařízení dle daných požadavků zákazníků nebo s ohledem na emisní normy v různých zemích světa a různé druhy spalovaného odpadu.

S ohledem na spalování spalitelného kapalného odpadu např.: kontaminované ropné látky, rozpouštědla, oleje, atd. Kapalným odpadem spalujeme 1:3 s pevným odpadem, abychom zaručili přibližně stejnou výhřevnost a v podstatě stejný hmotností poměr.

Z hlediska bezpečnosti musí být splněny požadavky na eliminaci úniku radioaktivních látek do okolí, proto musí být zaručeny požadavky na neprodyšnost v prostoru příjmu odpadu. U výsypky popela je většinou použit dvojitý systém zajištění uzávěru. Podobná ochranná opatření jsou použita i u hlavních částí spalovny, hořáku, spalovací komory, přívádění paliva do ohniště.

7.2. Úprava odpadu před a po spalování

Pevné odpady nepotřebují žádné speciální opatření pro jejich spálení, když je zaručeno, že neobsahují více než 5 % nehořlavého materiálu. Pevné odpady se před spalováním třídí na hořlavé a nehořlavé a jsou baleny do PE pytlů. Kapalným odpadem se spalují dohromady s pevnými. Jediný problém v tomto procesu představují roztoky, které obsahují příliš velké množství vody, a proto je třeba je dodávat do spalovacího zařízení jako emulze, aby nedošlo k přerušování hoření, a v důsledku toho k špatnému spalování a vzniku vyššího procenta škodlivých látek při nedokonalém hoření.

Vzniklý odpad ze spalování může být:

- stlačen a uskladněn jako pevný odpad,
- pomocí cementace smíchán s cementem a uložen jako pevný odpad,
- roztaven s ostatními pevnými částmi a uložen jako pevný odpad,
- roztoky z čištění spalin, jsou buď cementovány nebo sušeny a spolu s popelem a dalšími zbytky roztaveny.

7.3. Dávkování do spalovací komory

Spalitelné kapalné odpady jsou přečerpány do nádrže přes filtr. V nádrži dochází k promíchávání odpadu. Kapalný obsah nádrže je veden potrubním systémem do hořáku ve spalovací komoře, kde dojde k jeho spálení společně s pevným odpadem. Při společném spalování obou odpadů musíme redukovat příjem pevného odpadu do spalovací komory, pro přibližně stejnou tepelnou výkonnost.

Pevné spalitelné odpady se dovážejí do spalovny v sudech, ve kterých jsou již naplněny do PE pytlů. Sudy jsou manuálně otevřeny a umístěny na zdvižnou plošinu. Odpady jsou přesypány do prostoru, ze kterého jsou ručně přeneseny do přijímacího prostoru. Pomocí gravitace padají pytle na dávkovací systém, který posléze automaticky spustí dávkování spalovny. Všechny tyto operace probíhají v zabezpečené části spalovny, aby se zabránilo kontaminaci ovzduší v okolí a ve spalovně. Plnění probíhá v intervalech 4–10 min, podle velikosti balení a výhřevnosti.



Obr.7. *Odpad*

(<http://docplayer.cz/177571-Uloziste-jaderneho-odpadu.html>)

7.4. Proces spalování

Spalovna se skládá ze spalovací komory s mechanickým roštem. Pevný odpad v PE pytlích se dávkuje horním vhozem do spalovací komory a poté padá na rošt. Pro spalování potřebuje dostatečný přísun spalovacího vzduchu, který zajišťuje vzduchový ventilátor. Vzduch je dodáván přes HEPA filtr, který slouží jako ochrana ovzduší při možných přetlakových stavech. Spodní část spalovny je vybavena ventilem pro odvod popela.

Pro náběh systému využíváme plynový či jiný typ hořáku, který přehřeje spalovací komoru na teplotu okolo 750–800 °C. Přehřívací hořák používáme jen pro náběh systému nebo v takových stavech, kdy spalovaný odpad nemá dostatečnou výhřevnost, aby udržel trvalé hoření.

Teplota spalovaného odpadu by neměla přesáhnout 900 °C, po přesáhnutí této teploty by se tvořila struska a docházelo by k tunutí strusky na stěnách.

Pevný odpad je spalován v nižší oblasti spalovací komory, kam přivádíme 1/3 spalovacího vzduchu. Do procesu přivádíme páru smíchanou se vzduchem pomocí elektrického ohřívače, který vzduch zahřeje na teplotu 120 °C. Spalovací teplota by se měla pohybovat mezi 800–1000 °C.

Když spalujeme pevný odpad s kapalným, nahrazujeme plyn v hořáku za kapalný odpad. Odváděné spaliny ze spalovací komory obsahují stále hořlavé plyny a pevné zbytky, které přicházejí do dohořivací komory, kde dochází k jejich dopálení. V dohořivací komoře je přídavný plynový hořák, který udržuje teplotu mezi 900–1200 °C. Teplota spalin a setrvání v dohořivací komoře déle než 2s zaručuje likvidaci všech organických částí. Obsah kyslíku se udržuje na 6 % a spaliny opouštějící komoru jsou zchlazeny pomocí vstřiku vody na 850 °C. Vodní sprcha zajistí, že popel obsažený ve spalinách utvoří pevné části, které spadnou na dno dohořivací komory.

7.5. Odvod popela

Popel ve spalovací komoře padá do popelové komory, kde jej ochladíme na teplotu nižší než 120 °C a dále padá do popelové jímky. Teplota 120 °C je vhodná pro další manipulaci s popelem. Popel z dohořivací komory padá přímo do popelové jímky. Odstranění popele probíhá jednou denně pro odpad ze spalovací komory a jednou za týden z dohořivací komory. Popel je dopravován pomocí vibračního pásu do přepravních nádob, ze kterých je dále transportován k vysokotlakému lisovacímu zařízení, které zredukuje objemové množství popela. Popel je po této úpravě ukládán do sudů, které jsou vloženy do ještě větších sudů. Vzniklá mezera mezi sudy se zalije betonem a vnější sud je následně opatřen antikoročním nátěrem. Takto jsou sudy připraveny pro transport k trvalému uložení.

7.6. Podtlak ve spalovacím systému

Podtlak ve spalovacím zařízení vytváříme pomocí dvou ventilátorů. Hlavní ventilátor vytváří podtlak při normálním provozu a pomocný ventilátor vytváří podtlak při pohotovostních stavech nebo během přerušení spalování. Pomocí otáček hnacího motoru regulujeme stejný podtlak.

7.7. Čištění spalin

Mokrý čištění spalin bez využití tepla

Plyny ve spalinách obsahují nebezpečné složky: NO_x, HF, SO₂, HCl, radioaktivní nuklidy a těžké kovy. Jejich odstranění probíhá následovně.

Spaliny o teplotě 850 °C opouštějí dohořivací komoru a jsou ve statickém směšovači smíchány s přidávaným vzduchem, nebo dochlazený vodním vstříkem na teplotu 200–250 °C. Rychlým ochlazením zabráníme vzniku PCDD/F, které vznikají mezi 600–300 °C. Spaliny jsou dále čištěny ve dvou po sobě jdoucích krocích pomocí dvou tryskových praček. V jedné udržujeme pH-hodnotu roztoku na úrovni 0,5–1,5 pomocí hydroxidu sodného. V druhé pH-hodnotu udržujeme mezi 7–9 také za pomoci hydroxidu sodného, v této pračce dochází k úplnému

odstranění SO₂ a minimalizaci CO₂. Obě pračky mají vlastní oběhová čerpadla a jsou od sebe odděleny. Použitý roztok je dále vypouštěn k další úpravě.

Vysušení roztoku

Pokud není možné provést proces cementace, provádíme sušení roztoku. Roztok obsahuje chemické složení různých látek. Chemické složení roztoku závisí na druhu spalovaného odpadu. Průměrné složení roztoku pak bude:

Tabulka 2. *Složení roztoku*

Látka	Množství
hodnota pH	6–9
Popílek	10–50g/l
NaCl	10–15 % hmotnosti
Na₂SO₄	1–2 % hmotnosti
těžké kovy	dle druhu odpadu
specifická aktivita	10 ⁷ –10 ¹⁰ Bq/m ³

Použitý roztok je vypuštěn z praček do nádrže, která je vybavena míchacím zařízením pro rozmíchání. Rozmíchávání zabraňuje tvorbě pevných částí v nádrži. Snížení objemu dosáhneme pomocí fluidní vrstvy reaktoru, kde roztok vysušíme za teploty, která se pohybuje v rozmezí 150–200 °C. Teplota vzniklých odcházejících plynů se pohybuje okolo 100 °C.

Vysušený materiál obsahuje maximálně 1 % vody. Produkt můžeme spolu s popelem lisovat a poté ukládat do sudů. Množství roztoku pro tento spalovací cyklus se pohybuje mezi 20–50kg/h.

HEPA filtry

Po průchodu spalín přes druhou tryskovou pračku prochází skoro vyčištěné spaliny do HEPA filtru, který zadrží pevné částice. Filtr pracuje s účinností 99,9 % a používá se hlavně pro zachycení netěkavých radioaktivních nuklidů. Filtry jsou instalovány vedle sebe pro bezpečný provoz, kdyby poklesl tlak v jednom filtru. Pomocí elektrického ohřívače přehřejeme spaliny do výšky rosného bodu, abychom se vyhnuli kondenzaci vody.

Eliminace NO_x a dioxinů

Spaliny očištěné od většiny nebezpečných částí a radionuklidů, prochází přes ventilátor ke katalytickému reaktoru. Spaliny jsou přehřívány z 90 °C na 300–320°C a smíchány se čpavkem. Pomocí výměníku zahřejeme spaliny na 220 °C, a poté pomocí elektrického ohřívače dosáhneme požadované teploty až 320 °C. Čpavek vmícháváme do spalin z důvodu snížení NO_x. Amoniak je míchán ve směšovači s bočním tokem spalin. Vznikla směs se dostává do druhého směšovače, kde se smíchá s hlavním tokem spalin.

Po vstupu spalin do reaktoru dochází k redukci NO₂ a NO_x, a poté k likvidaci furanů a dioxinů. S furanu a dioxinu likvidací vznikají malé koncentrace HCl a CO₂, které neovlivňují celkovou koncentraci ve spalinách. Spaliny jsou po vyčištění ochlazovány pomocí výměníku na cca 170 °C.

8. Lisování RAO

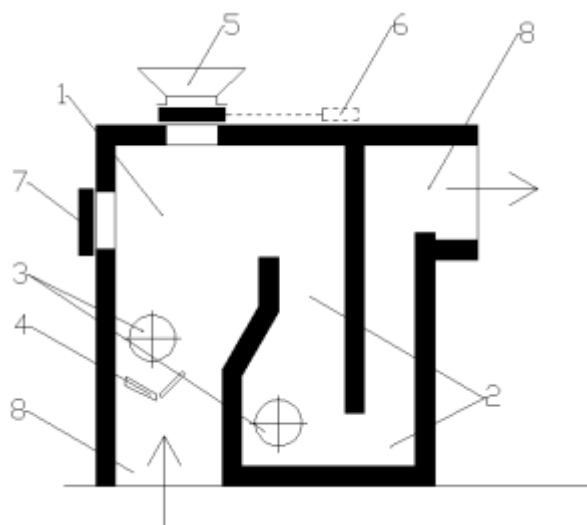
Popel a ostatní lisovatelný odpad je uložen v uzavřených sudech a označen. Sudy jsou přemístěny do místnosti, kde dochází k přípravě na lisování. V této místnosti dochází ke změření sudů přístroji na hmotnost, radioaktivity a dávkového přísunu. Změřené sudy putují k vysokotlakému lisu, který má lisovací tlak 20 000 kN. Vylisovaný odpad se vkládá do vlákno-betonových kontejnerů a ty pokračují na cementační linku. Tam dojde k vyplnění volných prostor cementovou směsí a zafixování radionuklidů.

S odpadem, který nejde slisovat a nejde ani spalovat nakládáme stejně, jako se spalitelným.

Vysokotlaký lis:

- lisovací síla – 20 000kN,
- redukční poměr – 4–8krát.

9. Návrh spalování



Obr.8. Schéma spalovací pece [4]

1. Spalovací prostor, 2. Dohořivací komora, 3. Hořák H1, H2, 4. Pevný rošt 5. Plnicí otvor, 6. Pohon plnicího mechanismu, 7. Manipulační otvor, 8. Odvod spalín

9.1. Výhřevnost RAO

Výhřevnost odpadu je 18 MJ/kg a vlhkost paliva 30 %. Spalovna bude spalovat 45kg/hod RAO. Výpočtové vzorce a postupy, jsem použil z literatury. [1]

Tepelný příkon v odpadu

$$P_p = m_o \times Q_c \quad [\text{MW}] \quad (1)$$

$$P_p = \frac{45}{3600} \times 18 = 0,225 \text{ MW}$$

Množství spalovacího vzduchu

$$\text{teoretické suché: } V_{vz,t}^s = Q_c \times 0,245 + 0,5 = 18 \times 0,245 + 0,5 = 4,91 \frac{m^3 N}{kg} \quad (2)$$

$$\text{teoretické vlhké: } V_{vz,t}^v = V_{vz,t}^s \times v = 4,91 \times 1,05 = 5,155 \frac{m^3 N}{kg} \quad (3)$$

$v = 1,05$ – součinitel pro množství vodní páry ve vzduchu

Množství spalin

$$\text{Teoretické suché: } V_{sp,t}^s = Q_c \times 0,227 + 1,375 = 18 \times 0,227 + 1,375 = 5,461 \frac{m^3 N}{kg} \quad (4)$$

Teoretické vlhké: $H = 10\%$, $w^r = 30\%$

$$V_{H_2O} = 44,8 \times \left(\frac{H}{4}\right) + 22,4 \times \left(\frac{w^r}{18}\right) + (v - 1) \times V_{vz,t}^s \left[\frac{m^3 N}{kg} \right] \quad (5)$$

$$V_{H_2O} = 44,8 \times \left(\frac{0,1}{4}\right) + 22,4 \times \left(\frac{0,3}{18}\right) + (1,04 - 1) \times 4,91 = 1,69 \frac{m^3 N}{kg}$$

$$V_{sp,t}^v = V_{sp,t}^s + V_{H_2O} = 5,461 + 1,69 = 7,151 \frac{m^3 N}{kg} \quad (6)$$

Skutečné vlhké množství:

$$V_{sp,s}^v = V_{sp,t}^v + (n - 1) \times V_{vz,t}^v = 7,151 + (1,7 - 1) \times 5,155 = 10,76 \frac{m^3 N}{kg} \quad (7)$$

Objemový tok vlhkých spalin:

$$V_{sp,obj}^v = V_{sp,s}^v \times m_o = 10,76 \times 0,0125 = 0,1345 \frac{m^3 N}{s} \Rightarrow 484,2 \frac{m^3 N}{hod} \quad (8)$$

$t = 0^\circ\text{C}$, $p = 101\,325\text{ Pa}$

Plynné palivo spalování:

Teoretické množství suchého spalovacího vzduchu:

$$V_{vz,t,pl}^s = 1,07 \times \frac{Q_p}{4186,7} = 1,07 \times \frac{38\,000}{4186,7} = 9,7 \frac{m^3 N}{m^3 N} \quad (9)$$

Množství spalin z plynu

Skutečné množství vlhkých spalin:

$$V_{H_2O} = 0,38 + 0,0179 \times Q_p = 0,38 + 0,0179 \times 38 = 1,06 \frac{m^3 N}{m^3 N} \quad (10)$$

$$V_{sp,s,pl}^v = n_p \times V_{vz,t,pl}^s + V_{H_2O} = 1,05 \times 9,7 + 1,06 = 10,8 \frac{m^3 N}{m^3 N} \quad (11)$$

n_p – přebytek vzduchu pro plyn

Objemový tok vlhkých spalin z plynu:

$$V_{sp,obj,pl}^v = V_{pl} \times V_{sp,pl}^v = 45 \times 10,8 = 486 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,135 \frac{m^3 N}{s} \quad (12)$$

9.2. Spalovací a dohořívací komora

Teplota spalin v spalovací komoře:

$$m_o \times Q_c = V_{sp,obj} \times c_{sp} \times t_{sp1} \times (1 + z_1) \Rightarrow t_{sp1} = \frac{m_o \times Q_c}{V_{sp,obj} \times c_{sp} \times (1 + z_1)} [^{\circ}C] \quad (13)$$

$$t_{sp1} = \frac{0,0125 \times 18\,000}{0,1345 \times 1,68 \times (1 + 0,3)} = 766\,^{\circ}C$$

Objem ve spalovací peci průtočně

Množství vzduchu v první komoře spalovací komora:

$$V_{vz1} = m_o \times n_1 \times V_{vz,t}^s = 50 \times 1 \times 4,91 = 245,5 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,068 \frac{m^3 N}{s} \quad (14)$$

n_1 – stechiometrické spalování - 1

Množství vzduchu v druhé komoře dohořívací komora:

$$V_{vz2} = m_o \times n_2 \times V_{vz,t}^s \times 0,25 = 50 \times 2,5 \times 4,91 \times 0,25 = 153,4 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,043 \frac{m^3 N}{s} \quad (15)$$

Přebytek vzduchu – 1,5, pro 25% odpadu.

Množství vzduchu celkového (odpad):

$$V_{vz,c,o} = m_o \times n_c \times V_{vz,t}^s = 50 \times 2,2 \times 4,91 = 540,1 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,15 \frac{m^3 N}{s} \quad (16)$$

2,2 – celkový přebytek vzduchu (n_c)

Množství vzduchu v obou komorách:

$$V_{vz1+2} = V_{z1} + V_{z2} = 245,5 + 153,4 = 398,9 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,11 \frac{m^3 N}{s} \quad (17)$$

Směšovač:

$$V_{vz,sm} = V_{vz,c,o} - V_{v1+2} = 540,1 - 398,9 = 141,2 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,039 \frac{m^3 N}{s} \quad (18)$$

Množství vlhkých spalin:

$$V_{sp,obj,c}^v = V_{sp,obj,od}^v + V_{sp,obj,pl}^v = 484,2 + 486 = 970,2 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 0,27 \frac{m^3 N}{s} \quad (19)$$

Teplota spalin – dohořívací komora ($t_{sp2} = 1\,000\,^{\circ}C$):

$$V_{sp2} = V_{sp,obj,c} \times \frac{T_{sp2}}{T_N} = 970,2 \times \frac{1273}{273} = 4\,524 \frac{m^3 N}{hod} \Rightarrow 1,256 \frac{m^3 N}{s} \quad (20)$$

9.3. Návrh velikosti dohořivací komory

Rozměry:

a	0,515 m	t _c	0,12 m
b	4,14 m	v _c	1,4 m
c	1,8 m	a _c	0,515 m

Objem:

$$V_{DK} = a \times b \times c - 3 \times t_c \times v_c \times a_c \quad (21)$$

$$V_{DK} = 0,515 \times 4,14 \times 1,8 - 3 \times 0,12 \times 1,4 \times 0,515$$

$$V_{DK} = 3,58 \text{ m}^3$$

Čas zdržení spalin v dohořivací komoře:

$$\tau_{sp,kds} = \frac{V_{DK}}{V_{sp2}} = \frac{3,58}{1,256} = 2,85 \Rightarrow \text{cca 3 sekundy} \quad (22)$$

9.4. Vyzdívka

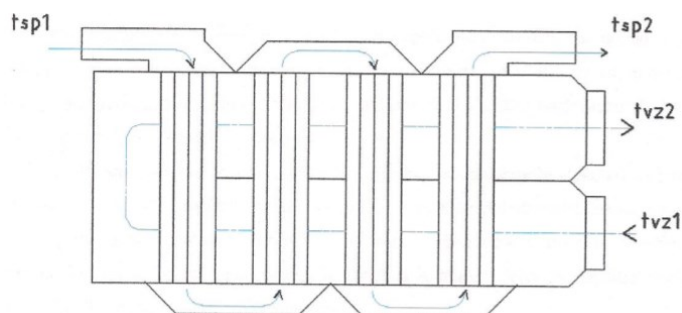
Pro návrh vyzdívky jsem využil internetové stránky firem: ZEOLIT Kladno spol, s.r.o. a ŽÁROHMOTY spol, s.r.o. [5][6]

Tabulka 3. Návrh vyzdívky

Jakost	maximální teplota použití	Spotřeba materiálu	Zrnitost	Vlhkost	Trvalé délkové změny		Pevnost v tlaku			
	°C				%	°C	MPa	°C	MPa	°C
CARSIRAM 46	1600	2300	0-5	7 až 8	0,1	1500	10	110	22	1500
PHC 100	1300	2300	0-6	6 až 9	-0,9	1300	9	110	19	1300
ACIKUP HRUBÝ	1500	1900	0-8	8	2	1400	/	/	/	/
Malta G III	1500	1900	0-2	6	1	1400	/	/	/	/

10. Výměník – Návrh

Pro výpočet a návrh výměníku jsem použil literaturu [7]. Použijeme výměník na využití odpadního tepla. Výměník je protiproudý a je umístěn mimo spalovací komoru. Výměník ochladí spaliny na požadovanou teplotu 220 °C.



Obr.9. Schéma výměníku

t_{sp1} , t_{sp2} – teploty spalin

t_{vz1} , t_{vz2} – teploty vzduchu

10.1. Parametry výměníku

$$i = 1,370816786 \times t + 0,000158951 \times t^2 \quad (23)$$

$$i_{220} = 309,3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad i_{1000} = 1529,8 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Tepelný výkon:

$$Q = V_{sp,obj,c}^v \times \Delta i = 0,27 \times (1529,8 - 309,3) = 329,53 \text{ kW} \quad (24)$$

Objemový průtok vzduchu:

$$c_{vz} = 956,7 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad t_{vz2} = 20^\circ\text{C} \text{ (teplota vzduchu vstup)}$$

$$V_{vz,n} = \frac{Q}{c_{vz} \times (t_{vz1} + t_{vz2})} = \frac{418\,630}{956,7 \times (273,15 + 20)} = 1,73 \frac{\text{m}^3 \text{N}}{\text{s}} \quad (25)$$

Teplota vzduchu na výstupu z výměníku při $V_{vz,n} = 1,73 \frac{m^3 N}{s}$:

$$t_{vz,2} = t_{vz} + \frac{Q}{c_{vz} \times V_{vz,n}} = 20 + \frac{418\,630}{956,7 \times 1,73} = 253 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (26)$$

Strana spalin

Skutečný objem spalin na vstupu do výměníku:

$$V_{sp1} = V_{sp,obj,c}^v \times \frac{t_{sp1} + 273,15}{273,15} = 0,27 \times \frac{1000 - 273,15}{273,15} = 0,718 \frac{m^3 N}{s} \quad (27)$$

Skutečný objem spalin na výstupu z výměníku:

$$V_{sp2} = V_{sp,obj,c}^v \times \frac{t_{sp2} + 273,15}{273,15} = 0,27 \times \frac{220 + 273,15}{273,15} = 0,487 \frac{m^3 N}{s} \quad (28)$$

Max. rychlost proudění spalin v trubkách volím $30 m \cdot s^{-1}$

Měrné teplo spalin:

$$c_{sp} = \frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{1529,8 - 308,3}{1000 - 220} = 1,6 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \quad (29)$$

případně

$$c_{sp} = 2,147 \times 10^{-4} \times T_{sp1} + 1,46 = 2,147 \times 10^{-4} \times (1000 + 273,15) + 1,46 = 1,7 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \quad (30)$$

Rychlost spalin na vstupu:

n_{tr} – počet trubek (70ks), S – plocha jedné trubky, d_1 – vnitřní průměr trubky (36,5mm).

$$w_{sp1} = \frac{V_{sp1}}{n_{tr} \times S} = \frac{0,718}{70 \times 0,001} = 10,26 \text{ m/s} \quad (31)$$

$$S = \frac{\pi \times d_1^2}{4} = \frac{\pi \times 0,0365^2}{4} = 0,001 \text{ m}^2 \quad (32)$$

Rychlost spalin na výstupu:

$$w_{sp2} = \frac{V_{sp2}}{n_{tr} \times S} = \frac{0,487}{70 \times 0,001} = 6,96 \text{ m/s} \quad (33)$$

Reynoldsovo číslo na vstupu spalin:

$$V_{sp,1} \text{ pro } 1000^{\circ}\text{C} = 2,41 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_{sp1} = \frac{w_{sp1} \times d_1}{V_{sp,1}} = \frac{10,26 \times 0,0365}{2,41 \times 10^{-4}} = 1\,554 \quad (34)$$

Reynoldsovo číslo na výstupu spalin:

$$V_{sp,2} \text{ pro } 220^{\circ}\text{C} = 7,81 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$Re_{sp2} = \frac{w_{sp2} \times d_1}{V_{sp,2}} = \frac{6,96 \times 0,0365}{7,81 \times 10^{-5}} = 3\,253 \quad (35)$$

Přestup tepla – spaliny

Výpočet Nusseltova kritéria:

Podtlak ve spalovací komoře – 50 až 100 Pa

$$Nu = 0,116 \times \left(1 + \frac{d_{ht}}{L}\right)^{0,667} \times (Re^{0,667} - 125) \times Pr^{0,33} \times \left(\frac{\mu_m}{\mu_{st}}\right)^{0,14} \quad [10][11] \quad (36)$$

Hustota spalin:

$$\rho_{sp} = \frac{P_b - P_{pod}}{r \times (273,15 + t_{sp1000})} = \frac{101\,325 - 80}{287 \times (273,15 + 1000)} = 0,277 \text{ kg/m}^3 \quad (37)$$

$$\rho_{sp} = \frac{P_b - P_{pod}}{r \times (273,15 + t_{sp610})} = \frac{101\,325 - 80}{287 \times (273,15 + 610)} = 0,399 \text{ kg/m}^3 \quad (38)$$

$$\rho_{sp} = \frac{P_b - P_{pod}}{r \times (273,15 + t_{sp373})} = \frac{101\,325 - 80}{287 \times (273,15 + 373)} = 0,545 \text{ kg/m}^3 \quad (39)$$

Prandtlovo číslo Pr: [8]

$$Pr_{1000} = 0,763 \text{ pro } 1000^{\circ}\text{C}$$

$$Pr_{220} = 0,726 \text{ pro } 220^{\circ}\text{C}$$

Tepelná vodivost spalin:

$$\lambda_{1000} = 0,0876 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \text{ pro } 1000^\circ\text{C}$$

$$\lambda_{220} = 0,05314 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \text{ pro } 220^\circ\text{C}$$

Kinematická viskozita:

$$\nu_{1000} = 2,41 \times 10^{-4} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} \text{ pro } 1000^\circ\text{C}$$

$$\nu_{610} = 9,847 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} \text{ pro } 610^\circ\text{C}$$

$$\nu_{373} = 5,45 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} \text{ pro } 373^\circ\text{C}$$

$$\nu_{220} = 7,81 \times 10^{-5} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1} \text{ pro } 220^\circ\text{C}$$

Dynamická viskozita:

$$\text{Určíme ze vzorce pro kinetickou viskozitu} - \nu = \frac{\mu}{\rho} \Rightarrow \mu = \nu \times \rho \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\text{pro } t_m = \frac{1000+220}{2} = 610^\circ\text{C} \Rightarrow \mu_m = 3,9388 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (40)$$

$$\text{pro } t_{sr} = \frac{\frac{253+20}{2} + 610}{2} = 373^\circ\text{C} \Rightarrow \mu_m = 2,9702 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s} \quad (41)$$

Nusseltovo kritérium na vstupu spalin:

$$\text{Nu}_{sp1} = 0,116 \times \left(1 + \frac{0,0365}{2,5}\right)^{0,667} \times (1554^{0,667} - 125) \times 0,763^{0,33} \times \left(\frac{3,9388 \times 10^{-5}}{2,9702 \times 10^{-5}}\right)^{0,14}$$

$$\text{Nu}_{sp1} = 1,06 \quad (36a)$$

Nusseltovo kritérium na výstupu spalin:

$$\text{Nu}_{sp2} = 0,116 \times \left(1 + \frac{0,0365}{2,5}\right)^{0,667} \times (3253^{0,667} - 125) \times 0,726^{0,33} \times \left(\frac{3,9388 \times 10^{-5}}{2,9702 \times 10^{-5}}\right)^{0,14}$$

$$\text{Nu}_{sp2} = 10,31 \quad (36b)$$

Součinitel přestupu tepla na vstupu spalin:

$$Nu = \frac{\alpha x d_{ekv}}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{Nu x \lambda}{d_{ekv}}$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu_{sp,1} x \lambda_{1000}}{d_{ekv}} = \frac{1,06 x 8,76 x 10^{-2}}{0,0365} = 2,55 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (42)$$

Součinitel přestupu tepla na výstupu spalin:

$$\alpha_2 = \frac{Nu_{sp,2} x \lambda_{220}}{d_{ekv}} = \frac{10,31 x 5,314 x 10^{-2}}{0,0365} = 15,01 \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (43)$$

Doplnění součinitele přestupu tepla o sálání na horké straně střední délky paprsku

V – objem plynného media, S – plocha plynného media

$$I = 3,5 \times (V/S) = 3,5 \times \frac{\left(\frac{\pi x d_1^2}{4}\right) x 2 x l}{\pi x d_1 x l} = 3,5 \times \frac{\left(\frac{\pi x 0,0365^2}{4}\right) x 2 x 2,5}{\pi x 0,0365 x 2,5} = 0,064 \text{ m [8]} \quad (44)$$

Spaliny složení:

$$CO_2 - 13,7\% \Rightarrow P_{CO_2} = 1,39 x 10^4 \text{ Pa}, C_{CO_2} = 1$$

$$H_2O - 12,1\% \Rightarrow P_{H_2O} = 1,23 x 10^4 \text{ Pa}, C_{H_2O} = 1,2$$

Teplota	ϵ_{CO_2}	ϵ_{H_2O}
1000°C	0,046	0,0185
610°C	0,052	0,034
220°C	0,049	0,051
$\epsilon_{stř}$	0,052	0,034

$$\epsilon_{sp} = C_{H_2O} \times \epsilon_{H_2O} + C_{CO_2} \times \epsilon_{CO_2} \quad (45)$$

$$\epsilon_{sp} = 1,2 \times 0,034 + 1 \times 0,052$$

$$\epsilon_{sp} = 0,0928$$

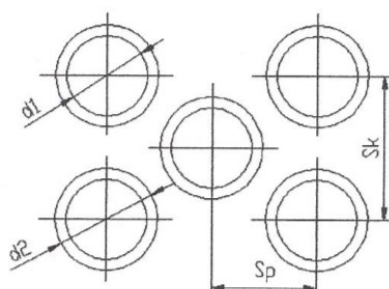
Součinitel přestupu tepla sáláním:

Pro teplotu 373 °C a 610 °C je hodnota $\beta = 85 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ [8]

$$\alpha_{sp,s} = \beta \times \epsilon_{sp} = 85 \times 0,0928 = 7,888 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (46)$$

Vzduch - výměník

$$S_k = 0,0545 \text{ m} \quad S_p = 0,045 \text{ m} \quad d_1 = 0,0365 \text{ m} \quad d_2 = 0,0445 \text{ m}$$



Objemový průtok vzduchu na vstupu:

Při normálním tlaku 101 325 Pa

$$V_{vz1} = V_{vz,v} \times \frac{t_{vz1} + 273}{273} = 1,5 \times \frac{20 + 273}{273} = 1,6 \frac{\text{m}^3 \text{N}}{\text{s}} \quad (47)$$

Objemový průtok vzduchu na výstupu:

$$V_{vz2} = V_{vz,v} \times \frac{t_{vz2} + 273}{273} = 1,5 \times \frac{253 + 273}{273} = 2,89 \frac{\text{m}^3 \text{N}}{\text{s}} \quad (48)$$

Rychlost vzduchu v nejužších místech:

Na vstupu:

$$w_{vz1} = \frac{V_{vz1}}{n_1 \times (S_k - d_2) \times l} = \frac{1,6}{10 \times (0,0545 - 0,0445) \times 2,5} = 6,4 \text{ m/s} \quad (49)$$

Na výstupu:

$$w_{vz2} = \frac{V_{vz2}}{n_1 \times (S_k - d_2) \times l} = \frac{2,89}{10 \times (0,0545 - 0,0445) \times 2,5} = 11,6 \text{ m/s} \quad (50)$$

Charakteristika vzduchu

Pro odečet konstant jsem použil tabulku (voda, vzduch) a literaturu, která obsahuje danou tabulku. [9]

$$\begin{aligned}t_{vz1} &= 20^{\circ}\text{C} & \lambda_{vz1} &= 2,57 \times 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \\c_{vz1} &= 992,8 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \rho_{vz1} &= 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ \alpha_1 &= \frac{\lambda_{vz1}}{c_{vz1} \rho_{vz1}} = \frac{0,0257}{992,8 \times 1,293} = 2,002 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned} \quad (51)$$

$$\mu_{20} = 18,179 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$v_1 = \frac{\mu_{20}}{\rho_{vz1}} = \frac{18,179 \times 10^{-6}}{1,293} = 1,406 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (52)$$

$$\text{Pr}_1 = \frac{v_1}{\alpha_1} = \frac{1,406 \times 10^{-5}}{2,002 \times 10^{-5}} = 0,702 \quad (53)$$

$$t_{vz2} = 253^{\circ}\text{C} \quad \lambda_{vz2} = 3,27 \times 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$c_{vz2} = 1038 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \rho_{vz2} = 0,674 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{vz2}}{c_{vz2} \rho_{vz2}} = \frac{0,0327}{1038 \times 0,674} = 4,67 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (54)$$

$$\mu_{253} = 36,665 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$v_2 = \frac{\mu_{253}}{\rho_{vz2}} = \frac{36,665 \times 10^{-6}}{0,674} = 5,44 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (55)$$

$$\text{Pr}_2 = \frac{v_2}{\alpha_2} = \frac{5,44 \times 10^{-5}}{4,67 \times 10^{-5}} = 1,165 \quad (56)$$

Výpočet d_{ekv} :

$$d_{ekv} = \frac{4xS}{O} = \frac{4x(n_1x(Sk-d_2)+I)}{2x(n_1x(Sk-d_2)+I)} = \frac{4x(10x(0,0545-0,0445)+2,5)}{2x(10x(0,0545-0,0445)+2,5)} = 0,397 \text{ m} \quad (57)$$

Reynoldsovo číslo na vstupu vzduchu:

$$Re_{vz1} = \frac{w_{vz1} d_{ekv}}{V_{vz,1}} = \frac{6,4x0,397}{1,406x10^{-5}} = 180\,711 \quad (58)$$

Reynoldsovo číslo na výstupu vzduchu:

$$Re_{vz2} = \frac{w_{vz2} d_{ekv}}{V_{vz,2}} = \frac{11,6x0,397}{5,44x10^{-5}} = 84\,655 \quad (59)$$

Přestup tepla – vzduch

Pro odečet konstant jsem použil tabulku (voda, vzduch) a literaturu, která obsahuje danou tabulku. [9]

Nusseltovo kritérium:

pro $Re > 10^4$

$$Nu = 0,021 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,43} \times \left(\frac{Pr_m}{Pr_{st}}\right)^{0,25} \quad [10] \quad (60)$$

$$t_{sr} = 373^\circ\text{C} \quad \lambda_{sr} = 5,05 \times 10^{-2} \frac{W}{m \cdot K}$$

$$c_{st} = 1062 \frac{J}{kg \cdot K} \quad \rho_{vz} = 1,293 \frac{kg}{m^3}$$

$$\alpha_{st} = \frac{\lambda_{sr}}{c_{st} \rho_{vz}} = \frac{0,0505}{1062 \times 1,293} = 3,68 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (61)$$

$$\mu_{373} = 32,70 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$v_{st} = \frac{\mu_{373}}{\rho_{vz}} = \frac{32,70 \times 10^{-6}}{1,293} = 2,53 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (62)$$

$$Pr_{st} = \frac{v_{st}}{\alpha_{st}} = \frac{2,53 \times 10^{-5}}{3,68 \times 10^{-5}} = 0,687 \quad (63)$$

$$t_m = 137^\circ\text{C} \Rightarrow \frac{253+20}{2} \quad \lambda_m = 3,48 \times 10^{-2} \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

$$c_m = 1013 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \rho_{vz} = 1,293 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\alpha_m = \frac{\lambda_m}{c_m x \rho_{vz}} = \frac{0,0348}{1013 \times 1,293} = 2,657 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (64)$$

$$\mu_{137} = 23,74 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$v_m = \frac{\mu_{137}}{\rho_{vz}} = \frac{23,74 \times 10^{-6}}{1,293} = 1,836 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad (65)$$

$$\text{Pr}_m = \frac{v_m}{\alpha_m} = \frac{1,836 \times 10^{-5}}{2,657 \times 10^{-5}} = 0,691 \quad (66)$$

Nusseltovo kritérium pro vzduch na vstupu do výměníku:

$$\text{Nu}_{vz1} = 0,021 \times 180\,711^{0,8} \times 0,702^{0,43} \times \left(\frac{0,691}{0,687}\right)^{0,25} \quad (60a)$$

$$\text{Nu}_{vz1} = 290$$

Nusseltovo kritérium pro vzduch na výstupu z výměníku:

$$\text{Nu}_{vz2} = 0,021 \times 84\,655^{0,8} \times 1,165^{0,43} \times \left(\frac{0,691}{0,687}\right)^{0,25} \quad (60b)$$

$$\text{Nu}_{vz2} = 196,6$$

Součinitel přestupu tepla pro vstup do výměníku:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha x d_{ekv}}{\lambda} \Rightarrow \alpha = \frac{\text{Nu} x \lambda}{d_{ekv}}$$

$$\alpha_{vz1} = \frac{\text{Nu}_{vz1} x \lambda_{20}}{d_{ekv}} = \frac{290 \times 2,57 \times 10^{-2}}{0,397} = 18,77 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (67)$$

Součinitel přestupu tepla pro výstup z výměníku:

$$\alpha_{vz2} = \frac{\text{Nu}_{vz2} x \lambda_{253}}{d_{ekv}} = \frac{196,6 \times 3,27 \times 10^{-2}}{0,397} = 16,19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (68)$$

Prostup tepla

Součinitel prostupu tepla:

$$k = \frac{2x\pi}{\frac{1}{\alpha_{SP}xR_1} + \frac{1}{\lambda_0}x\ln\frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{\alpha_{VZ}xR_2}} \Rightarrow \lambda_0 = 35 \frac{W}{m \cdot K} \quad (69)$$

Součinitel prostupu tepla - vstup do výměníku:

$$k_1 = \frac{2x\pi}{\frac{1}{19,82x0,01825} + \frac{1}{35}x\ln\frac{0,02225}{0,01825} + \frac{1}{18,77x0,02225}} = 1,216 \frac{W}{m \cdot K} \quad (70)$$

Součinitel prostupu tepla - výstup z výměníku:

$$k_2 = \frac{2x\pi}{\frac{1}{13,22x0,01825} + \frac{1}{35}x\ln\frac{0,02225}{0,01825} + \frac{1}{16,19x0,02225}} = 0,901 \frac{W}{m \cdot K} \quad (71)$$

Střední hodnota součinitele přestupu tepla:

$$k = 0,5 \times (k_1 + k_2) = 0,5 \times (1,216 + 0,901) = 1,056 \frac{W}{m \cdot K} \quad (72)$$

Logaritmický spád

Opravu křížového proudu můžeme zanedbat, jestliže uvažujeme čtyři tahy. Výpočet středního logaritmického spádu provedeme pro čistý protiproud.

$$\Delta t_s = \frac{(t_{sp,1} - t_{vz,2}) - (t_{sp,2} - t_{vz,1})}{\ln \frac{t_{sp,1} - t_{vz,2}}{t_{sp,2} - t_{vz,1}}} \quad (73)$$

$$\Delta t_s = \frac{(1000 - 253) - (220 - 20)}{\ln \frac{1000 - 253}{220 - 20}} = 415^\circ\text{C}$$

Návrh délky trubek

Teplo sdílené ve výměníku:

$$Q = k \times l \times n_{trc} \times \Delta t_s \Rightarrow l$$

$$l = \frac{Q}{k \times n_{trc} \times \Delta t_s} = \frac{418\,630}{1,056 \times 280 \times 415} \approx 3,4 \text{ m} \quad (74)$$

Aerodynamický výpočet ztrát

Třecí ztráty:

$$P_{\text{tr}} = \lambda_{\text{tr}} \times \frac{l}{d} \times \frac{w^2}{2} \times \rho \times \left(1 + \frac{T}{273,15}\right) \quad (75)$$

Ztráty místní pomocí Blaisova vztahu pro částečnou turbulenci a hladké proudění:

$$P_{\text{zmi}} = \xi \times \frac{w^2}{2} \times \rho \times \left(1 + \frac{T}{273,15}\right) \quad (76)$$

10.2. Ztráty spaliny

Ztráta tření I. tah:

$$\begin{aligned} l &= 3,4 \text{ m} & w_{\text{sp},I} &= 21,1 \frac{\text{m}}{\text{s}} & \rho_{\text{spn}} &= 0,301 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} & \lambda_I &= \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \\ d &= 0,0365 \text{ m} & Re_{\text{sp},I} &= 3544,5 & t_{\text{sp},I} &= 902,5^\circ\text{C} & \lambda_{\text{sp},I} &= 0,041 \frac{W}{m \cdot K} \end{aligned}$$

$$P_{\text{trI}} = 0,041 \times \frac{3,4}{0,0365} \times \frac{21,1^2}{2} \times 0,301 \times \left(1 + \frac{902,5 + 273,15}{273,15}\right) = 1\,357 \text{ Pa} \quad (75a)$$

Ztráta tření II. tah:

$$\begin{aligned} l &= 3,4 \text{ m} & w_{\text{sp},II} &= 17,6 \frac{\text{m}}{\text{s}} & \rho_{\text{spn}} &= 0,362 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ d &= 0,0365 \text{ m} & Re_{\text{sp},II} &= 3714 & t_{\text{sp},II} &= 707,5^\circ\text{C} & \lambda_{\text{sp},II} &= 0,0404 \frac{W}{m \cdot K} \end{aligned}$$

$$P_{\text{trII}} = 0,0404 \times \frac{3,4}{0,0365} \times \frac{17,6^2}{2} \times 0,362 \times \left(1 + \frac{707,5 + 273,15}{273,15}\right) = 968,5 \text{ Pa} \quad (75b)$$

Ztráta tření III. tah:

$$l = 3,4 \text{ m} \quad w_{sp,III} = 14,1 \frac{m}{s} \quad \rho_{spn} = 0,450 \frac{kg}{m^3}$$

$$d = 0,0365 \text{ m} \quad Re_{sp,III} = 3883 \quad t_{sp,III} = 512,5^\circ\text{C} \quad \lambda_{sp,III} = 0,04 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$P_{třIII} = 0,04 \times \frac{3,4}{0,0365} \times \frac{14,1^2}{2} \times 0,450 \times \left(1 + \frac{512,5 + 273,15}{273,15}\right) = 646 \text{ Pa} \quad (75c)$$

Ztráta tření IV. tah:

$$l = 3,4 \text{ m} \quad w_{sp,IV} = 10,6 \frac{m}{s} \quad \rho_{spn} = 0,615 \frac{kg}{m^3}$$

$$d = 0,0365 \text{ m} \quad Re_{sp,IV} = 4052 \quad t_{sp,IV} = 317,5^\circ\text{C} \quad \lambda_{sp,IV} = 0,0396 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$P_{třIV} = 0,0396 \times \frac{3,4}{0,0365} \times \frac{10,6^2}{2} \times 0,615 \times \left(1 + \frac{317,5 + 273,15}{273,15}\right) = 403 \text{ Pa} \quad (75d)$$

Celková ztráta třením P_{ztr} :

$$P_{ztr} = P_{třI} + P_{třII} + P_{třIII} + P_{třIV} = 3\,374,5 \text{ Pa} \quad (77)$$

Vstup spalin do chladiče a do trubek: Místní ztráta I.tah

$$P_{zmi} = \xi \times \frac{w^2}{2} \times \rho \times \left(1 + \frac{T_{sp}}{273,15}\right), \quad \xi = 1,5 + 0,5 = 2$$

$$P_{zmiI} = 2 \times \frac{21,12^2}{2} \times 0,301 \times \left(1 + \frac{902,5}{273,15}\right) = 577 \text{ Pa} \quad (76a)$$

Vstup spalin do chladiče a do trubek: Místní ztráta II.tah

$$\xi = 1 + 1,5 + 0,5 = 3$$

$$P_{zmiII} = 3 \times \frac{17,6^2}{2} \times 0,362 \times \left(1 + \frac{707,5}{273,15}\right) = 604 \text{ Pa} \quad (76b)$$

Vstup spalín do chladiče a do trubek: Místní ztráta III.tah

$$\xi = 1 + 1,3 + 0,5 = 2,8$$

$$P_{zmiIII} = 2,8 \times \frac{14,1^2}{2} \times 0,45 \times \left(1 + \frac{512,5}{273,15}\right) = 360,4 \text{ Pa} \quad (76c)$$

Vstup spalín do chladiče a do trubek: Místní ztráta IV.tah

$$\xi = 1 + 1,5 + 0,5 = 3$$

$$P_{zmiIV} = 3 \times \frac{10,62^2}{2} \times 0,615 \times \left(1 + \frac{317,5}{273,15}\right) = 224,2 \text{ Pa} \quad (76d)$$

Místní ztráta pro změnu směru při výstupu z chladiče a s místními odpory na výstupu:

Vstup spalín do chladiče a do trubek: Místní ztráta V.tah

$$\xi = 1 \times 0,0033 + 1,05 = 2,083, \quad \rho_{spn} = 0,714 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$P_{zmiV} = 2,083 \times \frac{8,82^2}{2} \times 0,714 \times \left(1 + \frac{220}{273,15}\right) = 104,5 \text{ Pa} \quad (76e)$$

Celková ztráta místní P_{zmi} :

$$P_{zmi} = P_{zmiI} + P_{zmiII} + P_{zmiIII} + P_{zmiIV} + P_{zmiV} = 1873,7 \text{ Pa} \quad (78)$$

Celková ztráta P_z :

$$P_z = P_{ztr} + P_{zmi} = 5\,248,2 \text{ Pa} \quad (79)$$

10.3. Ztráty vzduch

Ztráta tření I.tah:

$$\begin{aligned} \rho_{vzn} &= 1,293 \frac{kg}{m^3} & \lambda_{vz,I} &= 0,0152 \frac{W}{m \cdot K} & w_{vz,I} &= 7,1 \frac{m}{s} & l &= 3,4 \text{ m} \\ t_{vz,I} &= 49^\circ C & d_{ekv} &= 0,397 \text{ m} & Re_{vz,I} &= 185\,266 \\ p_{třI} &= \lambda \times \frac{l}{d_{ekv}} \times \frac{w^2}{2} \times \rho_{vzn} \times \left(1 + \frac{T_{vz}}{273,15}\right) \end{aligned} \quad (80a)$$

$$p_{třI} = 0,0152 \times \frac{3,4}{0,397} \times \frac{7,1^2}{2} \times 1,293 \times \left(1 + \frac{49}{273,15}\right) = 5 \text{ Pa}$$

Ztráta tření II.tah:

$$\begin{aligned} \rho_{vzn} &= 1,293 \frac{kg}{m^3} & \lambda_{vz,II} &= 0,015 \frac{W}{m \cdot K} & w_{vz,II} &= 8,5 \frac{m}{s} & l &= 3,4 \text{ m} \\ t_{vz,II} &= 108^\circ C & d_{ekv} &= 0,397 \text{ m} & Re_{vz,II} &= 194\,377 \\ p_{třII} &= 0,015 \times \frac{3,4}{0,397} \times \frac{8,5^2}{2} \times 1,293 \times \left(1 + \frac{108}{273,15}\right) = 8,37 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (80b)$$

Místní ztráta I.tah: proudění vzduchu přes svazky trubek, vstup vzduchu

$$\begin{aligned} p_{zmi} &= \xi \times \frac{w^2}{2} \times \rho_{vzn} \times \left(1 + \frac{T_{vz}}{273,15}\right), \quad \xi = 0,16 + 4 \times 1,17 = 4,84 \\ p_{zmiI} &= 4,84 \times \frac{7,1^2}{2} \times 1,293 \times \left(1 + \frac{49}{273,15}\right) = 186 \text{ Pa} \end{aligned} \quad (81a)$$

Místní ztráta II.tah: změna směru vzduchu, proudění přes svazky trubek, výstup

$$\xi = 5 + 1,05 + 4 \times 1,17 = 10,73$$

$$p_{zmiI} = 10,73 \times \frac{8,5^2}{2} \times 1,293 \times \left(1 + \frac{108}{273,15}\right) = 699,5 \text{ Pa} \quad (81b)$$

Celkové ztráty vzduch p_z :

$$p_z = p_{třI} + p_{třII} + p_{zmiI} + p_{zmiII} = 898,87 \text{ Pa} \quad (82)$$

11. ZÁVĚR

Zpracování RAO formou spalování je ve světě hojně používanou metodou, jak redukovat a zneškodňovat RAO. Z hlediska ekologie jsou daná zařízení koncipována na nejvyšší bezpečnostní úrovni a za zisk vyplývající z tohoto procesu můžeme považovat využití energie vzniklé spálením odpadu a její vhodné využití.

Cílem diplomové práce bylo navrhnout spalovací zařízení na RAO o výkonu 45kg/h. Zařízení je určeno pro spalování všech typů odpadů.

Pro dokonalé spálení všech odpadů je použita i dohořivací komora, která obsahuje přídavný hořák udržující teplotu na 1000 °C. Spaliny by zde měly setrvat cca 3s. Dále následuje výměník spalin/vzduchu, který ochladí spaliny na 220 °C, tato teplota je vhodná pro čištění spalin.

Pro čištění spalin je v prvním kroku navržen vláknitý filtr. Odstraní cca 95 % pevných zbytků. V dalším kroku vstupují spaliny do nejdůležitější části – do praček. V těchto pračkách jsou odloučeny prachové částice a ze spalin jsou odstraněny anorganické sloučeniny fluóru, chlóru, CO, SO₂, NO_x, organických látek a dalších. V posledním kroku spaliny procházejí přes HEPA filtr, který odstraní poslední pevné částice s účinností 99 %.

Spalovna je jištěna zabezpečovacím systémem, který kontroluje základní funkce spalovny a jejich správnou funkčnost. Celé zařízení je ovládáno z velína, kde příslušný pracovník kontroluje informace o teplotách celého zařízení a dalších hodnotách, které se mu zobrazují na kontrolním panelu.

Spalovna je navrhována s maximální bezpečností, jak pro ochranu osob a obyvatel žijících v okolí, tak i pro případné poruchy systému.

Seznam použité literatury

1. Doc. Ing. Pavel KOLAT, DrSc.: *Posudek na spalovnu WSP 100, WSP 250, WSP500 od firmy Wasteko a.s. Ostrov n.O.* VŠB-TUO 15. 7. 1999.
2. Prof. Ing. Karel OBROUČKA, CSc.: *Termické zneškodňování odpadů.* VŠB-TUO, 1997, ISBN 80-7078-505-5.
3. TOMČALA, Jiří, KOLAT, Pavel. *Likvidace radioaktivních odpadů spalováním.* Jaderná energie, 1/1990, s. 32–35.
4. KADLEC, Zdeněk. *Průvodce sdílením tepla pro požární specialisty.* Ostrava 2009, 100 s. ISBN 978-80-7385-0616.
5. ŽÁROHMOTY [online]. [2016-05-08]. Dostupné na WWW: <<http://www.zarohmoty.cz>>
6. ZEOLIT Kladno [online]. [2016-05-08]. Dostupné na WWW: <<http://www.zeolit.cz>>
7. RYBÍN, Miroslav. *Spalování paliv hořlavých odpadů v ohništích průmyslových kotlů.* Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1985. 420s.
8. BÁLEK, Stanislav. *Tepelně technické tabulky a diagramy.* Ostrava: VŠB-TUO, 1999. ISBN 80-7078-974-3.
9. BLAHOŽ, Vladimír, KADLEC, Zdeněk. *Základy sdílení tepla.* Ostrava: VŠB-TUO, 2000. 110s ISBN 80-902001-1-7.
10. RÉDR, M. PŘÍHODA, M.: *Základy tepelné techniky.* Praha. SNTL, 1991, ISBN 80-03-00366-0.
11. DOBROZEMSKÝ, Jaroslav, KOLAT, Pavel. *Zneškodňování pevných radioaktivních odpadů.* Spalovna RAO. [s.l.] : [s.n.], 1988.
12. HEJZLAR, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren.* Díl 1. a 2. Praha: ČVUT, 2005. 385s. ISBN 80-01-03189-6.
13. E. TITLOVÁ: *Koncepcia technologického zpracovania pevných radioaktivních odpadů z jadroveoenergetických zariadení.* VÚJE Trnava, 1993.
14. DVOŘÁK, Zdeněk. *Výměníky tepla.* Praha: ČVUT, 1992. 121s. ISBN 80-01-00808-8.

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tabulka 1. Výhřevnost odpadu.....

Tabulka 2. Složení roztoku.....

Tabulka 3. Návrh vyzdívky.....

Obr. 1. Prostupnost záření.....

Obr. 2. Spalitelnost odpadů.....

Obr. 3. Schéma mokré čištění spalin.....

Obr. 4. Elektroodlučovač.....

Obr. 5. Tkaninový filtr.....

Obr. 6. Schéma spalovny hlavní části.....

Obr. 7. Odpad.....

Obr. 8. Schéma spalovací pece.....

Obr. 9. Schéma výměníku.....

Seznam příloh

Příloha č.1: Výměník

Příloha č.2: Vyzdívka